

# EFICIENCIA DE APLICACIÓN EN EL RIEGO POR SURCOS ABIERTOS AL EMPLEAR DOS PENDIENTES

Ernesto Vázquez Fernández

**RESUMEN:** Se presentan resultados comparativos de eficiencias de aplicación en el riego con recorte en surcos abiertos cuando existen una y dos pendientes longitudinales fuertes (0.2% o mayores). En surcos de dos pendientes, con la menor en la parte baja y el cambio de ellas a 0.75 de la longitud, el incremento de la eficiencia, con respecto a la de surcos con pendiente única es del orden del 13%. Esto permite concluir que si en el campo se presenta esta situación favorable, no es conveniente explanar las parcelas con una sola pendiente, o bien, si ya tienen una pendiente y fuera posible explanar para que los surcos tuvieran dos pendientes, la eficiencia sería más alta.

## INTRODUCCIÓN

Se han probado con éxito dos métodos de riego que incrementan la eficiencia de aplicación del riego continuo óptimo con surcos abiertos: el de recorte o "cut back" y el de riego intermitente o "surge flow" (Stringham y Keller, en Walker y Skogerboe, 1987). Humpherys (en Jensen, 1980) recomienda un criterio muy práctico de aplicar en el campo para hacer el recorte a la mitad del gasto inicial una vez que termina la etapa de avance del agua, y es el que se emplea en este trabajo. Camacho et al. (1997) proponen el manejo y control del riego a través de la información que se envía al modelo numérico MEPI para decidir con oportunidad la magnitud del recorte y el tiempo de riego, y así lograr incrementar la eficiencia. El modelo SIRMOD (Universidad de Utah, 1989) puede diseñar la magnitud del recorte y el tiempo de riego. En cuanto al riego intermitente, el diseño debe ser más preciso porque interviene, además del gasto, el tiempo de activación de las válvulas electrónicas.

En el diseño del riego con surcos abiertos la pendiente longitudinal siempre se ha tratado como parámetro y tiene una influencia importante si la pendiente es única (Vázquez, 1996); sin embargo, cuando se da el mismo desnivel de una pendiente fuerte (medido desde la cabecera a la parte más baja) con dos pendientes diferentes, esta influencia se hace más significativa, repercutiendo en la posibilidad de incrementar la eficiencia de aplicación si la pendiente mayor se ubica en la cabecera de los surcos. El modelo numérico empleado, llamado SURCOS-A (Instituto de Ingeniería, 1998) resuelve las ecuaciones completas de Saint-Venant y usa, para calcular el gasto de infiltración vertical, el perímetro mojado del surco y la fórmula teórica de Green-Ampt (Chu, 1978):

$$\frac{dZ}{d\tau} = K \cdot \left( 1 + \frac{\lambda}{Z} \right) \quad (1)$$

Donde  $dZ/d\tau$  es la velocidad de infiltración vertical, en cm/min;  $\tau$  es el tiempo de contacto del agua con el suelo, en min;  $K$  la conductividad hidráulica, en cm/min;  $\lambda$  es el producto de las diferencias de humedades y tensiones del suelo, en cm; y  $Z$  es la lámina de infiltración acumulada, en cm.

Dado que la lámina de infiltración acumulada se encuentra en el denominador del lado derecho de la ecuación 1, se requiere un valor inicial diferente a cero; por tanto, en todas las simulaciones numéricas de los dos incisos siguientes y del apéndice, se usa un valor constante de 3 cm.

El procedimiento de cálculo seguido para obtener la lámina de infiltración acumulada en el modelo numérico (que usa un esquema en diferencias finitas) es, primero, multiplicar la velocidad de infiltración vertical por el perímetro mojado del surco,  $P$ , en m, y la longitud del tramo considerado,  $\Delta x$ , en m, para determinar el gasto de infiltración vertical,  $Q_z$ , en  $m^3/s$ . Esto es:

$$Q_z = \left( \frac{1}{6000} \right) \cdot P \Delta x \cdot \frac{dZ}{d\tau} \quad (2)$$

Después, al multiplicarse el gasto de infiltración por el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , en s, el volumen de infiltración vertical,  $V_z$ , en  $m^3$ , es:

$$V_z = Q_z \cdot \Delta t \quad (3)$$

Finalmente, si cada volumen infiltrado se acumula desde el primer instante,  $j = 1$ , hasta el último,  $j = u$ , durante el tiempo de contacto del agua y se divide al final

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.6 Num.3 (septiembre 1999), páginas 275-282, recibido el 7 de octubre de 1998 y aceptado para su publicación el 14 de abril de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

entre un área formada por la misma longitud  $\Delta x$  y la separación entre surcos,  $D$ , en  $m$ , se obtiene la lámina de infiltración acumulada,  $Z_i$ , en  $m$ , para cada tramo  $i$ .

$$Z_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=u} V_z^j}{\Delta x \cdot D} \quad (4)$$

Cuando algún valor  $Z_i$  es igual a la dosis,  $Z_m$ , que deseaba infiltrarse, el riego es satisfactorio.

### PROCEDIMIENTO EN LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

En las simulaciones numéricas del riego continuo con surcos abiertos al emplear el modelo SURCOS-A se obtienen eficiencias máximas del orden del 58%; por ello, se buscaron ejemplos de riego continuo con una determinada sección transversal del surco, longitud, pendiente única, coeficiente de aspereza de Manning, datos paramétricos de la fórmula de Green-Ampt y gasto para que la eficiencia fuera próxima a este valor (ver *Tabla A.1* del apéndice).

Para obtener los resultados del método de recorte que se anotan en las tablas de los siguientes incisos, se aumentó el gasto inicial y se recortó a la mitad una vez terminada

la duración de la etapa de avance de agua. Las eficiencias, comparadas con las del riego continuo, aumentaron, pero fue todavía mayor el incremento al emplear dos pendientes en vez de una. En el inciso de análisis de resultados se presenta un razonamiento que justifica este incremento.

### SIMULACIONES NUMÉRICAS EN SURCOS CON UNA PENDIENTE

Los surcos de sección transversal parabólica empleados en este trabajo fueron tomados de Bautista y Wallender (1993a, surco Schwankl), Vázquez (1996, surco Celaya) y Camacho et al. (1997, surco Córdoba), con los parámetros geométricos mostrados en la *Tabla 1* para calcular el área de la sección transversal,  $A$ , y el radio hidráulico,  $R$ , según las ecuaciones:

Nombre del Surco	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\rho_1$	$\rho_2$
Schwankl (Se)	1.0	1.696	0.333	0.508
Celaya (Cy)	0.913	1.5	0.43	0.555
Córdoba (Cd)	1.0409	1.6383	0.4981	0.596

*Tabla 1. Parámetros de los surcos*

Surco	K (cm/min)	$\lambda$ (cm)	L (m)	D (cm)	Zm (cm)	$\Delta z$ (cm)
Sc(1)	0.013	57.0	230	75.1	18.0	46.000
Cd(2)	0.017	44.0	225	74.8	17.5	47.250
Cy(3)	0.019	40.0	220	75.0	17.0	47.850
Sc(4)	0.022	33.0	215	75.1	16.5	48.375
Cd(5)	0.024	31.0	210	74.8	16.0	48.825
Cy(6)	0.027	29.0	205	75.0	15.5	49.200
Sc(7)	0.030	23.0	200	75.1	15.0	49.500
Cd(8)	0.032	20.7	195	74.8	14.5	49.725
Cy(9)	0.035	20.0	190	75.0	14.0	49.875
Sc(10)	0.038	17.0	185	75.1	13.5	49.950
Cd(11)	0.040	15.0	180	74.8	13.0	49.950
Cy(12)	0.043	14.5	175	75.0	12.5	49.875
Sc(13)	0.045	13.0	170	75.1	12.0	49.725
Cd(14)	0.048	11.0	165	74.8	11.5	49.500
Cy(15)	0.051	10.0	160	75.0	11.0	49.200
Sc(16)	0.053	10.0	155	75.1	10.5	48.825
Cd(17)	0.056	9.5	150	74.8	10.0	48.375
Cy(18)	0.059	10.0	145	75.0	9.5	47.850
Se(19)	0.061	7.5	140	75.1	9.0	47.250
Cd(20)	0.064	7.5	135	74.8	8.5	46.575
Cy(21)	0.066	9.0	130	75.0	8.0	45.825
Sc(22)	0.069	8.0	125	75.1	7.5	45.000
Cd(23)	0.072	7.0	120	74.8	7.0	44.100
Cy(24)	0.074	7.0	115	75.0	6.5	43.125
Sc(25)	0.077	6.0	110	75.1	6.0	42.075
Cd(26)	0.080	4.8	105	74.8	5.5	40.950
Cy(27)	0.083	6.7	100	75.0	5.0	40.000

*Tabla 2. Datos principales*

$$A = \sigma_1 y^{\sigma_2} \quad (5)$$

$$R = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (6)$$

Los parámetros  $\sigma_1, \sigma_2, \rho_1, \rho_2$  se obtienen, después de tomar logaritmos en ambos lados de las ecuaciones, a través de un ajuste por regresión lineal simple. El tirante del flujo es  $y$ .

Los parámetros de la ecuación de Green-Ampt;  $K$  y  $\lambda$ ; longitud,  $L$ ; separación entre surcos,  $D$ ; dosis requerida,  $Zm$  y desnivel  $\Delta z$  se muestran en la *Tabla 2* de datos principales para diferentes surcos. Estos se identifican en la primera columna por el nombre abreviado de la *Tabla 1* asociado con el número de simulación entre paréntesis. El coeficiente de aspereza de Manning no se anota porque se ha usado un valor igual a  $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$  en todos los casos.

En la *Tabla 3* se muestran los resultados para diferentes valores de la pendiente,  $S_0$ , y gasto,  $Q$ . Ahí,  $ta$  es la duración de la etapa de avance del agua,  $Tr$  el tiempo de riego y  $\eta$  la eficiencia de aplicación. En todos los casos se satisface la dosis y el error en la ecuación de continuidad (*volumen de ingreso = volumen infiltrado + vo-*

*lumen escurrido*) es menor del 3%; además, se reproduce un riego con recorte, donde el gasto después de la etapa de avance es la mitad del inicial: Así, la eficiencia de aplicación, en %, resulta:

$$\eta = \frac{2 \cdot L \cdot D \cdot Zm}{6 \cdot Q \cdot (ta + Tr)} \quad (7)$$

Donde  $L$  está dado en  $m$ ,  $Zm$  y  $D$  en  $cm$ ,  $ta$  y  $Tr$  en  $min$ , y  $Q$  en  $l/s$ .

### SIMULACIONES NUMÉRICAS EN SURCOS CON DOS PENDIENTES

La *Tabla 4* de la página siguiente muestra los resultados de las simulaciones numéricas donde hay un cambio de pendiente a la mitad del surco, cumpliendo siempre con el desnivel  $\Delta z$  de la *Tabla 2*. La pendiente de aguas arriba,  $S_1$  es mayor y la de aguas abajo,  $S_2$ , es menor. Estas son las posiciones para lograr un incremento de la eficiencia. Las pendientes son las que producen la máxima eficiencia para un gasto que no erosione el suelo en el tramo de mayor pendiente. Booher (1974) recomienda que este gasto, en  $l/s$ , no sea mayor que  $0.6/S$ , donde  $S$

Surco	$S_0$ (%)	$Q$ (l/s)	$Ta$ (min)	$Tr$ (min)	$\eta$ (%)
Sc(1)	0.2000	1.20	134	1248	62
Cd(2)	0.2100	1.40	105	1002	63
Cy(3)	0.2175	1.40	92	996	62
Sc(4)	0.2250	1.45	81	915	62
Cd(5)	0.2325	1.70	63	715	64
Cy(6)	0.2400	1.75	55	682	62
Sc(7)	0.2475	1.65	52	686	62
Cd(8)	0.2550	1.65	50	628	63
Cy(9)	0.2625	1.70	43	600	61
Sc(10)	0.2700	1.70	38	564	61
Cd(11)	0.2775	1.65	37	528	63
Cy(12)	0.2850	1.70	31	497	61
Sc(13)	0.2925	1.60	31	491	61
Cd(14)	0.3000	1.50	31	475	62
Cy(15)	0.3075	1.45	26	466	61
Sc(16)	0.3150	1.40	27	446	61
Cd(17)	0.3225	1.60	24	343	63
Cy(18)	0.3300	1.50	23	349	61
Sc(19)	0.3375	1.40	21	337	62
Cd(20)	0.3450	1.40	21	300	63
Cy(21)	0.3525	1.40	20	281	61
Sc(22)	0.3600	1.35	19	268	61
Cd(23)	0.3675	1.40	18	222	63
Cy(24)	0.3750	1.40	16	200	62
Sc(25)	0.3825	1.35	15	183	62
Cd(26)	0.3900	1.20	15	170	65
Cy(27)	0.4000	1.30	13	140	62

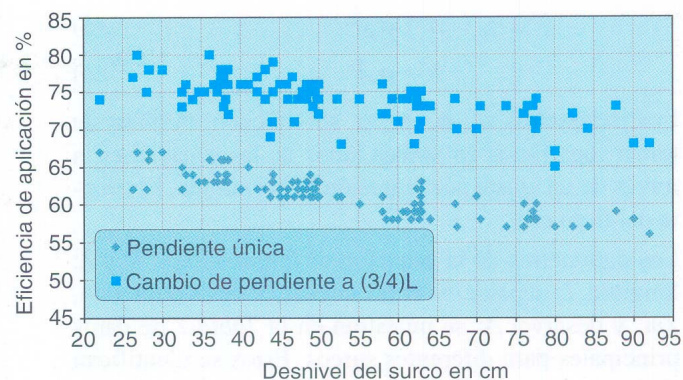
**Tabla 3.** Resultados de las simulaciones numéricas con una pendiente

es la pendiente en %. La eficiencia se anota como  $\eta_1$  y el incremento de la eficiencia como  $\Delta\eta = \eta_1 - \eta$ .

En la *Tabla 5* se presentan los resultados de las simulaciones numéricas con la pendiente aguas abajo,  $S_2$ , igual a 1/4 de la pendiente única de la *Tabla 3*; así, el valor de la pendiente aguas arriba,  $S_1$ , queda obligado para cumplir con el desnivel  $\Delta Z$  de la *Tabla 2*. Estas relaciones de pendientes son las que han producido las eficiencias más altas. El cambio de pendiente se hace a los 3/4 de la longitud del surco (medida desde la cabecera). En la antepenúltima columna se identifica a la eficiencia de aplicación como  $\eta_2$  para diferenciarla de las anotadas en las tablas 3 y 4. Obsérvese que  $\eta_2 > \eta_1 > \eta$ . El incremento de la eficiencia, con respecto a los resultados de la *Tabla 3* vale  $\Delta h = \eta_2 - \eta$ . El ahorro de agua,  $Ag$ , también con respecto al riego con una pendiente, puede calcularse con la ecuación:

$$Ag = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_2}\right) \cdot 100 \quad (8)$$

Las eficiencias de los 27 surcos de las *Tablas 3 y 5*, así como las de otros 83 que suman un total de 110 se muestran en la *Figura 1*; en el eje horizontal se identifica el



**Figura 1.** Eficiencia de aplicación según el desnivel del surco

desnivel del surco y en el vertical la eficiencia de aplicación. Obsérvese que en todos los casos la eficiencia del riego es mayor en surcos con dos pendientes y el cambio de ellas a 3/4 de la longitud. Además, hay una tendencia a que las eficiencias disminuyan conforme aumenta el desnivel del surco; esto equivale a decir que en surcos de la misma longitud la eficiencia, sea con una o dos pendientes, se hace menor al aumentar la pendiente en la cabecera.

Surco	$S_1$ (%)	$S_2$ (%)	Q (l/s)	$t_a$ (min)	Tr (rain)	$\eta_1$ (%)	$\Delta\eta$ (%)
Se(1)	0.3000	0.1000	1.30	132	1130	69	7
Cd(2)	0.3200	0.1000	1.40	103	916	70	7
Cy(3)	0.3350	0.1000	1.40	91	885	69	7
Se(4)	0.3500	0.1000	1.45	81	814	70	8
Cd(5)	0.3400	0.1250	1.70	64	654	70	6
Cy(6)	0.3400	0.1400	1.75	56	619	68	6
Se(7)	0.3600	0.1350	1.65	53	618	69	7
Cd(8)	0.3600	0.1500	1.65	50	577	69	6
Cy(9)	0.3500	0.1750	1.70	43	553	67	6
Se(10)	0.3500	0.1900	1.70	38	525	66	5
Cd(11)	0.3550	0.2000	1.65	37	498	67	4
Cy(i2)	0.3700	0.2000	1.70	31	461	66	5
Se(13)	0.3750	0.2100	1.60	31	457	66	5
Cd(14)	0.4000	0.2000	1.50	31	441	68	6
Cy(is)	0.4150	0.2000	1.45	26	427	67	6
Se(16)	0.4300	0.2000	1.40	27	405	67	6
Cd(17)	0.3750	0.2700	1.60	24	333	65	2
Cy(l8)	0.4000	0.2600	1.50	23	331	64	3
Se(19)	0.4250	0.2500	1.40	20	316	66	4
Cd(20)	0.4200	0.2700	1.40	21	288	65	2
Cy(21)	0.4300	0.2750	1.40	20	267	64	3
Se(22)	0.4400	0.2800	1.35	19	253	64	3
Cd(23)	0.4300	0.3050	1.40	17	214	65	2
Cy(24)	0.4300	0.3200	1.40	15	192	65	3
Se(25)	0.4400	0.3250	1.35	14	176	65	3
Cd(26)	0.5000	0.2800	1.20	14	158	70	5
Cy(27)	0.4500	0.3500	1.30	13	136	65	3

*Tabla 4. Resultados de las simulaciones numéricas con el cambio dependiente a  $L/2$*



Surco	$S_1$ (%)	$S_2$ (%)	Q (l/s)	$t_a$ (rain)	Tr (min)	$\eta_2$ (%)	$\Delta\eta$ (%)	Ag (%)
Se(1)	0.2500	0.0500	1.20	133	1047	74	12	16.2
Cd(2)	0.2625	0.0525	1.40	104	859	74	11	14.9
Cy(3)	0.2719	0.0544	1.40	91	822	75	13	17.3
Sc(4)	0.2813	0.0563	1.45	81	762	74	12	16.2
Cd(5)	0.2906	0.0581	1.70	62	613	75	11	14.7
Cy(6)	0.3000	0.0600	1.75	55	562	75	13	17.3
Sc(7)	0.3094	0.0619	1.65	51	567	75	13	17.3
Cd(8)	0.3188	0.0638	1.65	49	561	76	13	17.1
Cy(9)	0.3281	0.0656	1.70	42	488	74	13	17.6
Sc(10)	0.3375	0.0675	1.70	38	461	74	13	17.6
Cd(11)	0.3469	0.0694	1.65	36	442	76	13	17.1
Cy(12)	0.3563	0.0713	1.70	30	400	72	11	15.3
Sc(13)	0.3656	0.0731	1.60	30	397	74	13	17.6
Cd(14)	0.3750	0.0750	1.50	30	395	76	14	18.4
Cy(15)	0.3844	0.0769	1.45	26	370	73	12	16.4
Sc(16)	0.3938	0.0788	1.40	27	359	75	14	18.7
Cd(17)	0.4031	0.0806	1.45	26	321	76	13	17.1
Cy(18)	0.4125	0.0825	1.45	24	292	75	14	18.7
Sc(19)	0.4219	0.0844	1.40	20	268	74	12	16.2
Cd(20)	0.4313	0.0863	1.40	21	248	77	14	18.2
Cy(21)	0.4406	0.0881	1.35	21	236	76	15	19.7
Sc(22)	0.4500	0.0900	1.35	19	212	76	15	19.7
Cd(23)	0.4594	0.0919	1.30	18	204	75	12	16.0
Cy(24)	0.4688	0.0938	1.30	16	168	74	12	16.2
Sc(25)	0.4781	0.0956	1.25	15	156	75	13	17.3
Cd(26)	0.4875	0.0975	1.20	14	137	77	12	15.6
Cy(27)	0.5000	0.1000	1.20	14	119	76	14	18.4

Tabla 5. Resultados de las simulaciones numericas con el cambio de pendiente a (3/4)L

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

El incremento de la eficiencia se explica gracias al efecto del remanso producido por la pendiente de menor valor aguas abajo, lo que hace que el tirante del flujo sea mayor, se reduzcan las velocidades y los gastos de salida (coleos), se aumente la infiltración en la parte baja y se logre una mejor distribución de la lámina infiltrada. Este efecto es más notorio cuando el cambio de pendiente se hace a 3/4 de la longitud porque la pendiente en el ex-

tremo final del surco es más suave que cuando el cambio se hace a la mitad, produciendo un remanso más alto. En las Figuras 2 y 3 se muestran los perfiles del flujo al final de las fases de avance del agua y llenado para el surco Cd(14) con una y dos pendientes, respectivamente. El cambio de la pendiente para la Figura 3 corresponde a 3/4 de la longitud, en donde se aprecia la modificación del tirante ahí mismo, y uno mayor aguas abajo.

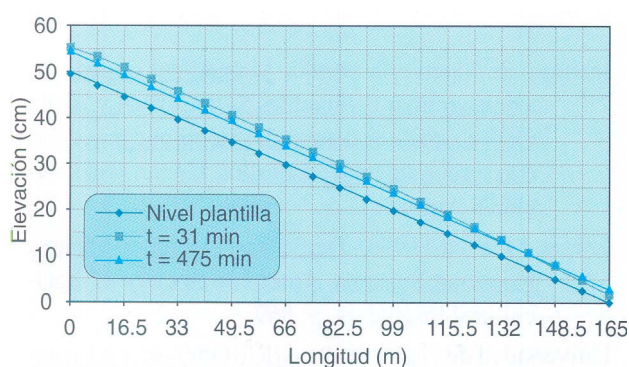


Figura 2. Perfil del flujo para una pendiente. Surco Cd(14)

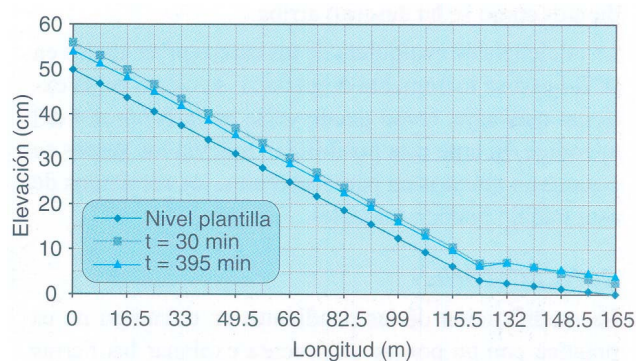
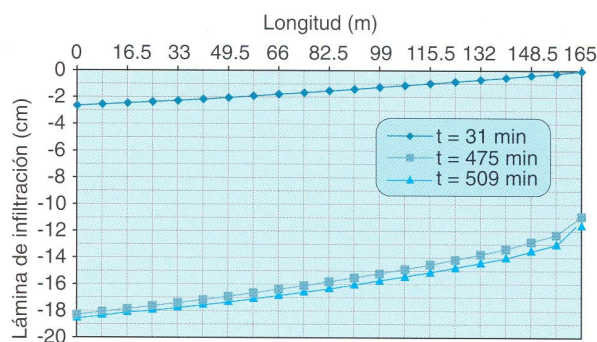


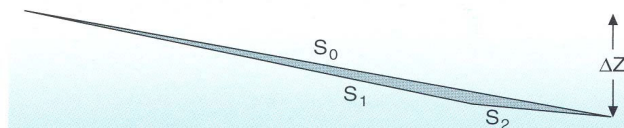
Figura 3. Perfil del flujo para dos pendientes con el cambio a (3/4)L. Surco Cd(14)



**Figura 4.** Láminas de infiltración para una pendiente. Surco Cd(14)

En las Figuras 4 y 5 se muestran las láminas de infiltración calculadas al final de las fases ya mencionadas y la de receso. Obsérvese que al término del proceso de riego con dos pendientes (Figura 5), la lámina infiltrada después del cambio de pendiente es muy próxima a la mínima del extremo inferior del surco; esta disminución de la lámina se produce por las razones expuestas arriba.

Desde el punto de vista práctico, la nivelación que requiere dos pendientes en la parcela, con la mayor en la parte alta, produciría un movimiento de tierras que levantaría un volumen de capa vegetal posiblemente perjudicial para el cultivo. Este volumen se calcularía como el producto del área sombreada comprendida entre las pendientes  $S_0$ ,  $S_1$  y  $S_2$  de la Figura 6, por el ancho de la parcela.



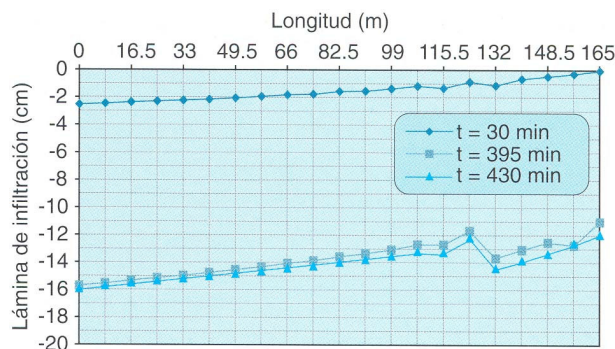
**Figura 6.** Capa vegetal removida al usar dos pendientes

Según los resultados del apéndice, la eficiencia de aplicación para dos pendientes con riego continuo (Tabla A.3) es mayor a la de riego con recorte en surcos con pendiente única (Tabla 3), es decir, con la modificación de las pendientes también se puede incrementar la eficiencia del riego continuo sin aplicar el método de recorte; no obstante, es obvio que es preferible emplear este último método y, si fuera posible, modificar las pendientes como se ha descrito arriba.

La eficiencia de cualquiera de los surcos presentados en la Tabla 5 se incrementa o iguala si se cierra en su extremo más bajo, como puede verse en la Tabla A.4 del apéndice. Si ante esta posibilidad todavía los surcos se conservan abiertos en parcelas reales, los resultados de este trabajo pueden ser útiles.

## CONCLUSIONES

La modificación de las pendientes en el campo no es práctica común porque se procura explanar las tierras con la pendiente natural; sin embargo, cuando se tenga una parcela con surcos abiertos y dos pendientes fuertes



**Figura 5.** Láminas de infiltración para dos pendientes con el cambio a (3/4). Surco Cd(14)

(mayores o iguales que 0.2%) diferentes, situándose la mayor en la parte alta, los resultados de este trabajo permiten concluir que conviene conservarlas.

Ahora bien, si fuera posible cambiar las pendientes de una sola a dos, con la mayor en la parte alta, sin afectar al cultivo por la remoción de la capa vegetal, el ahorro de agua puede llegar a ser significativo (hasta del 20%).

Los resultados teóricos de este trabajo podrían ser verificados con otro modelo numérico diferente al empleado aquí, o bien ser evaluados en el campo.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jesús Gracia Sánchez por sus opiniones y sugerencias.

## REFERENCIAS

- Bautista, E. y W. W. Wallender (1993a). *Reliability of Optimized Furrow-Infiltration Parameters*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 119, No. 5.
- Booher, L. J. (1974). *Surface Irrigation. Land and Water Development Series*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, p. 125.
- Camacho, E., C. Pérez, J. Roldan y M. Alcaide (1997). *Modelo de Manejo y Control en Tiempo Real del Riego por Surcos*. Ingeniería del Agua. Universidad Politécnica de Valencia, Vol. 4, No. 4.
- Chu, S. T. (1978). *Infiltration During an Unsteady Rain*. Water Resources Research. Vol. 14, No. 3.
- Instituto de Ingeniería (1998). *Manual del usuario de los programas ejecutables SURCOS-A y SURCOS-C para el diseño del riego por gravedad con surcos abiertos y cerrados*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Jensen, M. E. ed. (1980). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. American Society of Agricultural Engineers, p. 569.
- Universidad de Utah (1989). *SIRMOD Surface Irrigation Simulation Model*. The Utah State University Foundation.

Vázquez, E. (1996). *Formulación de un criterio para incrementar la eficiencia del riego por surcos, incluyendo el método de corte posterior. Tesis de Doctorado*. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Walker, R. y G. Skogerboe (1987). *Surface Irrigation*. Prentice Hall, New Jersey USA, p. 212.

Surco	S <sub>0</sub> (%)	Q (l/s)	ta (min)	Tr (min)	η (%)
Sc(1)	0.2000	0.80	134	1108	58
Cd(2)	0.2100	0.90	105	919	60
Cy(3)	0.2175	0.90	92	901	58
Sc(4)	0.2250	0.95	81	811	58
Cd(5)	0.2325	1.00	63	708	60
Cy(6)	0.2400	1.00	55	687	58
Sc(7)	0.2475	1.00	52	650	58
Cd(8)	0.2550	1.00	50	597	59
Cy(9)	0.2625	1.00	43	581	58
Sc(10)	0.2700	1.00	38	546	58
Cd(11)	0.2775	1.00	37	498	59
Cy(12)	0.2850	1.00	31	479	58
Sc(13)	0.2925	1.00	31	446	58
Cd(14)	0.3000	1.00	31	404	59
Cy(15)	0.3075	0.90	26	423	57
Sc(16)	0.3150	0.95	27	370	58
Cd(17)	0.3225	1.00	24	315	60
Cy(18)	0.3300	1.00	23	297	58
Sc(19)	0.3375	0.90	21	299	58
Cd(20)	0.3450	0.95	21	251	60
Cy(21)	0.3525	1.00	20	222	58
Sc(22)	0.3600	0.95	19	215	58
Cd(23)	0.3675	0.95	18	188	60
Cy(24)	0.3750	0.90	16	180	58
Sc(25)	0.3825	0.85	15	167	59
Cd(26)	0.3900	0.80	15	149	61
Cy(27)	0.4000	0.90	13	119	59

Tabla A.1. Resultados con riego continuo y una pendiente

# APÉNDICE. EFICIENCIAS DE APLICACIÓN PARA UNA Y DOS PENDIENTES CON RIEGO CONTINUO EN SURCOS ABIERTOS Y CERRADOS

Con el empleo de los datos de la *Tabla 2* del texto, en la *tabla A. 1* se presentan los resultados de las simulaciones numéricas para riego continuo con una pendiente. En las *Tablas A.2 y A.3* pueden verse los incrementos

Surco	S <sub>1</sub> (%)	S <sub>2</sub> (%)	Q (l/s)	ta (min)	Tr (min)	η <sub>1</sub> (%)	Δη (%)
Sc(1)	0.3000	0.1000	0.80	293	1008	65	7
Cd(2)	0.3200	0.1000	0.90	253	839	66	6
Cy(3)	0.3350	0.1000	0.90	221	806	66	8
Sc(4)	0.3500	0.1000	0.95	186	728	66	8
Cd(5)	0.3400	0.1250	1.00	182	653	65	5
Cy(6)	0.3400	0.1400	1.00	174	634	64	6
Sc(7)	0.3600	0.1350	1.00	142	594	64	6
Cd(8)	0.3600	0.1500	1.00	148	558	64	5
Cy(9)	0.3500	0.1750	1.00	131	543	62	4
Sc(10)	0.3500	0.1900	1.00	115	514	62	4
Cd(11)	0.3550	0.2000	1.00	112	474	63	4
Cy(12)	0.3700	0.2000	1.00	94	449	62	4
Sc(13)	0.3750	0.2100	1.00	81	420	62	4
Cd(14)	0.4000	0.2000	1.00	78	379	64	5
Cy(15)	0.4150	0.2000	0.90	75	391	63	6
Sc(16)	0.4300	0.2000	0.95	64	342	63	5
Cd(17)	0.3750	0.2700	1.00	62	305	62	2
Cy(18)	0.4000	0.2600	1.00	54	283	61	3
Sc(19)	0.4250	0.2500	0.90	43	282	62	3
Cd(20)	0.4200	0.2700	0.95	46	241	63	3
Cy(21)	0.4300	0.2750	1.00	39	213	61	3
Sc(22)	0.4400	0.2800	0.95	36	206	62	4
Cd(23)	0.4300	0.3050	0.95	35	182	62	2
Cy(24)	0.4300	0.3200	0.90	27	174	61	3
Sc(25)	0.4400	0.3250	0.85	23	162	61	2
Cd(26)	0.5000	0.2800	0.80	23	141	65	4
Cy(27)	0.4500	0.3500	0.90	19	116	61	2

Tabla A.2 Resultados con riego continuo y dos pendientes. Cambio de pendiente a L/2

de la eficiencia cuando se usan dos pendientes. La *Tabla A.4* muestra los resultados de las eficiencias para los mismos surcos cuando se cierran aguas abajo.

Surco	S <sub>1</sub> (%)	S <sub>2</sub> (%)	Q (l/s)	t <sub>a</sub> (min)	Tr (min)	η <sub>1</sub> (%)	Δη (%)
Sc(1)	0.2500	0.0500	0.80	303	959	69	11
Cd(2)	0.2625	0.0525	0.90	261	807	69	9
Cy(3)	0.2719	0.0544	0.90	228	768	70	12
Sc(4)	0.2813	0.0563	0.95	192	697	69	11
Cd(5)	0.2906	0.0581	1.00	188	620	70	10
Cy(6)	0.3000	0.0600	1.00	171	585	70	12
Sc(7)	0.3094	0.0619	1.00	144	555	70	12
Cd(8)	0.3188	0.0638	1.00	145	519	70	11
Cy(9)	0.3281	0.0656	1.00	129	490	70	12
Sc(10)	0.3375	0.0675	1.00	114	463	70	12
Cd(11)	0.3469	0.0694	1.00	111	430	71	12
Cy(12)	0.3563	0.0713	1.00	93	400	69	11
Sc(13)	0.3656	0.0731	1.00	82	376	70	12
Cd(14)	0.3750	0.0750	1.00	77	346	71	12
Cy(15)	0.3844	0.0769	0.90	74	349	68	11
Sc(16)	0.3938	0.0788	0.95	64	310	70	12
Cd(17)	0.4031	0.0806	1.00	62	269	72	12
Cy(18)	0.4125	0.0825	1.00	54	247	69	11
Sc(19)	0.4219	0.0844	0.90	44	248	69	11
Cd(20)	0.4313	0.0863	0.95	46	214	72	12
Cy(21)	0.4406	0.0881	1.00	39	185	70	12
Sc(22)	0.4500	0.0900	0.95	37	181	70	12
Cd(23)	0.4594	0.0919	0.95	35	161	72	12
Cy(24)	0.4688	0.0938	0.90	28	149	68	10
Sc(25)	0.4781	0.0956	0.85	24	139	69	10
Cd(26)	0.4875	0.0975	0.80	24	127	71	10
Cy(27)	0.5000	0.1000	0.90	20	99	69	10

*Tabla A.3. Resultados con riego continuo y dos pendientes. Cambio dependiente a (3/4)L*

Obsérvese que los gastos para surcos abiertos son idénticos; además, que las eficiencias de la *Tabla A.4* son mayores o iguales a las máximas para el corte posterior de la *Tabla 5* de texto.

Surco	S <sub>0</sub> (%)	Q (l/s)	t <sub>a</sub> (min)	Tr (min)	η (%)
Sc(1)	0.2000	0.80	308	800	81
Cd(2)	0.2100	0.90	266	685	82
Cy(3)	0.2175	0.90	232	655	79
Sc(4)	0.2250	0.95	194	590	79
Cd(5)	0.2325	1.00	190	535	80
Cy(6)	0.2400	1.00	173	510	79
Sc(7)	0.2475	1.00	144	480	78
Cd(8)	0.2550	1.00	146	455	79
Cy(9)	0.2625	1.00	130	430	78
Sc(10)	0.2700	1.00	114	415	77
Cd(11)	0.2775	1.00	111	385	78
Cy(12)	0.2850	1.00	93	360	77
Sc(13)	0.2925	1.00	81	340	76
Cd(14)	0.3000	1.00	77	315	77
Cy(15)	0.3075	0.90	74	320	76
Sc(16)	0.3150	0.75	123	360	77
Cd(17)	0.3225	0.75	146	330	77
Cy(18)	0.3300	0.75	124	310	76
Sc(19)	0.3375	0.75	75	275	76
Cd(20)	0.3450	0.75	98	250	77
Cy(21)	0.3525	0.75	92	235	76
Sc(22)	0.3600	0.75	74	210	76
Cd(23)	0.3675	0.75	75	180	77
Cy(24)	0.3750	0.75	50	165	76
Sc(25)	0.3825	0.75	35	150	75
Cd(26)	0.3900	0.75	29	125	77
Cy(27)	0.4000	0.75	38	110	76

*Tabla A.4. Resultados con riego continuo y una pendiente en surcos cerrados*